

分布式传感器网络研究进展

摘要：传感器技术和计算机网络的发展促使分布式传感器网络(DSN)快速发展，从少数大尺寸传感器的集合发展到微传感器集成，从固定节点发展到移动节点，从利用电话线通讯发展到无线通讯，从静态拓扑发展到动态拓扑。然而，技术的发展也带来了在有限带宽、有限能源、动态环境中处理大量数据的新的挑战。本文从网络结构、数据处理和最佳传感器配置策略几方面回顾了分布式传感器网络的发展，对我国分布式传感器网络的研究者将会有参考作用。

关键词：分布式传感器网络；数据处理；传感器配置

中图分类号：TP274⁺.2 **文献标识码：**A **文章编号：**1006-883X(2004)10-0006-005

►► 焦正 吴明红 王德庆

一、引言

传感器技术和计算机网络的发展推动了分布式传感器网络的发展，使其成为近年来一个重要的研究领域^[1-6]。虽然分布式传感器网络从经济上可行，但是为了满足当今民用和军用快速增长的复杂信息获取技术的要求，仍然有一些技术难点需要克服，包括环境监测、现场重建、移动跟踪、移动监测、遥感等。

图1是分布式传感器网络功能框图，它从功能上描绘出分布式传感器网络的组成部分。分布式传感器网络的最终目标是在基于分布式传感器输入的信息融合基础上获得知识和作出决策。在最底层，单个传感器节点从现场采集数据，并作初步的数据处理使采集的数据拥有相同的格式，然后，这些中间数据在上层数据处理中心进一步集成融合以获取知识和协助决策。

随着传感器尺寸的不断缩小和价格的不断降低，可以通过增加传感器数量来提高网络的可靠性；另一方面，传感器趋向于通过无线网络通讯，而无线网络的带宽远远小于有线网络。这些变化给分布式传感器网络设计带来了新的课题。首先，集成数据量大大增加；其次，无线通讯带宽减少；第三，单个传感器单元的能耗必须大大降低；第四，环境更加恶劣，导致网络连接不可靠，也增加了输入数据的错误率。

20世纪90年代以来有一些研究者发表文章，讨论了不同领域内分布式传感器网络的发展^[7-11]。本文将从以下几方面总结近年来分布式传感器网络的研究进展，包括：网络结构、数据处理、容错传感器融合算法和最佳传感器配置策略。

二、网络结构

20世纪80年代R.Wesson等最早开始了分布式传感器网的研究^[5]，主要工作是确定可以用于分布式传感器网络的结构。S.S.Iyengar等则对最早的设计作了重要的

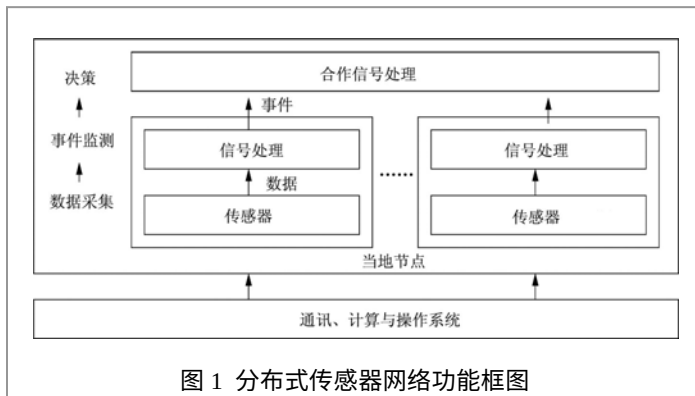


图1 分布式传感器网络功能框图

改进^[1]。

图 2 是常规的分布式传感器网络，包括一系列传感器节点和处理单元，以及联结不同处理单元的通讯网络。每个处理单元连接一个或多个传感器，每个处理单元以及与之相连的传感器称为簇。数据从传感器传送至与之相连的处理单元，在处理单元进行数据集成。处理单元相互合作以取得对环境的最佳评价，并向高层次处理单元报告。

R.Wesson 等在最初的工作中分析了两种结构^[5]：AC 结构和 DHC 结构，见图 3。AC 结构可以看作是完全相互联结的网络，没有分层，任何节点可以同任意另一个节点直接通讯，结点之间的联系是直接的。AC 结构虽然通讯方便，但是实现的费用较高，同时难以扩展。DHC 提供了一种分层结构，即树状结构，它只允许相邻层的节点相互通讯，而同层节点不能相互通讯。与 AC 相比，DHC 易于扩展，但可靠性较差，因为一个节点出错可能导致整个子网的断开。

为了克服 AC 和 DHC 的缺点，文献^[2, 4]中提出了混合 AC 和 DHC 的树状网络。该网络中的节点组织是很多二进制树，根部完全相连，如图 4。虽然树状结构改善了 DSN 的层状结构和鲁棒性，但是当信息向上传递时，底层节点的错误会积累起来。解决的方法之一是在网络底层将节点相互连接。S.S.Iyengar 等^[1]利用 deBruijn 图(DG)^[12]把每层的节点相互连接起来，如图 4。与 AC、DHC 和树状网络相比，DG 有较好的容错能力和可扩展性（网的大小与节点数为对数关系）。

传感器技术和无线通讯的发展使 Ad hoc 无线通讯网络(AWSN)成为现实。与传统的有线网络不同，在无线通讯网络中，传感器节点之间的联系是不断变化的，网络仅仅在需要通讯的短时间内才被建立^[13]。

以战场为例，战场上需要重量轻、廉价、高度专业性的传感器，它们能在恶劣环境中无规则分布，并构成传感器融合网络。每个单独的传感器节点可能不断变化，同时由于无线网络的高差错率，传感器的连接会断续。因此，有

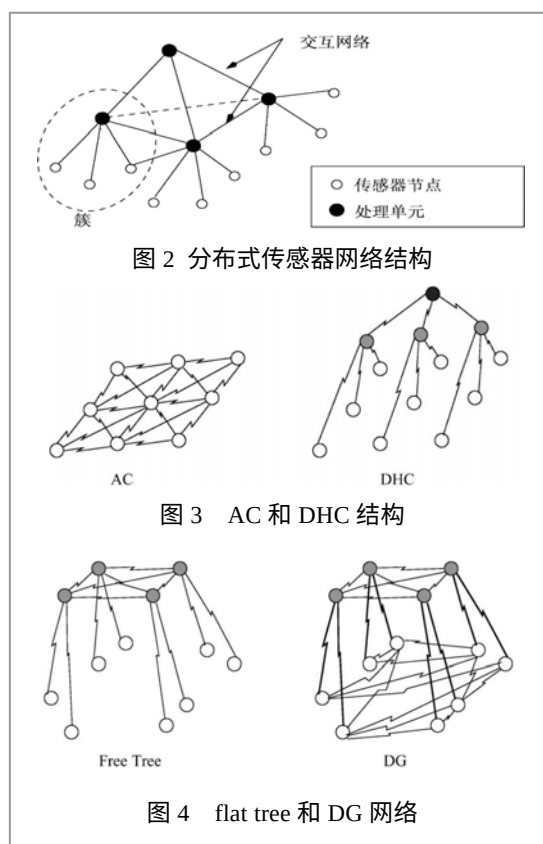


图 2 分布式传感器网络结构

图 3 AC 和 DHC 结构

图 4 flat tree 和 DG 网络

效的传感器融合网络必须提供高鲁棒性的通讯以克服节点差错和服务差错（例如某一类专用传感器失效）。

A.Lim 对自组织传感器网络的信息传播提出了分布式服务的概念^[14]。在动态的网络环境中，必须采用自适应的方法控制系统。A.Lim 特别提出了三种基本的服务：服务查找、传感器节点构成和动态自适应。

F.Wang 提出了基于智能分享空间概念的结构^[15]，每个传感器节点和服务被看作资源，在一个中央查找服务库中注册，对在传输范围内的所有节点都可见，通过对资源的智能管理达到信息共享、合作与融合，当某一传感器节点不再能提供服务时通过自动屏蔽此节点获得鲁棒性。

D.Estrin 等设计了一种局部化算法，其可在 AWSN 中建立有效的数据传输途径^[16]。它基本的原理来自生物学系统。数据的消费者产生对具有一定特征的数据的需求，节点通过一系列连接将要求传递到数据的生产者，这一过程在网络中建立了数据传输的通道。即使网络是动态的（动态操作条件，资源的动态有效性、动态任务），动态的影响也会被很好地局限于当地区域。

三、数据处理

无论网络结构有多大的不同，数据处理都倾向于采用一个普通的网络计算机模型：客户机/服务器模式。很多分布式系统都支持客户机/服务器模式，例如 RPC^[17]，CORBA^[18, 19]等等。在这一模型中，客户（单个传感器）向服务器（处理单元）送出数据，在服务器完成数据处理任务。然而这一模型也有一些缺点^[20]。

首先，客户机/服务器模式处理一件任务需要在网络上多次来回传输数据，每次传输都会消耗带宽。如果系统中有大量的用户和任务，将会出现带宽限制，导致系统性能降低。

其次，在客户机/服务器模式处理任务期间，网络连接需要正常完好，如果网络出现故障，任务必须重新开始。

第三，设计基于客户机/服务器模式的系统必须精确考

虑网络流量, 客户机与服务器的数量, 处理任务量等。如果估算不准确, 系统性能会降低, 而一旦系统形成, 就很难作任何更改。

H.Qi 等提出的移动代理概念可以解决以上问题^[21], 相应的分布式传感器网络称为基于移动代理的分布式传感器网络(MADSN)。MADSN 采用了新的计算策略, 数据停留在节点当地, 而集成处理代码在数据节点之间传输。MADSN 具有以下优点:

1、降低网络带宽需求。不需要在网络上传递大量原始数据, 仅仅需要代理传递少量数据。这一特性对于实时应用场合以及通过窄带宽进行无线通讯的场合特别重要。

2、改善网络可预测性。网络性能不受传感器数量增加的影响^[20]。

3、可扩展性。移动代理可以被编程以进行任务自适应的融合处理, 系统的能力得到了扩展。

4、稳定性。移动代理可以在网络联通时传送, 在网络重建时传回结果。所以 MADSN 的性能不受网络可靠性的影响。

表 1 是 DSN 和 MADSN 特性的比较, 图 5 是 DSN 和 MADSN 网络结构的比较。

表 1、DSN 和 MADSN 特性比较

特性	DSN	MADSN
网络传输介质	数据	计算
占用带宽	高	低
可否升级	不可	可
扩展性	不可	可
是否受网络可靠性影响	是	否
容错性	是	是

一般而言, 移动代理是一类特殊的可以自执行的软件, 开始执行后, 会自动在节点之间传输并处理数据。而一般的软件仅在被调用时才能执行。S.Franklin 和 A.Graesser 提出了移动代理的正式定义^[22], D.B.Lange 则列出了应用移动代理的七个原因^[23], 包括降低网络负载, 克服网络等待时间, 鲁棒性和容错性能好等。虽然由于安全原因, 移动代理在分布式计算中的作用仍在研究中^[24, 25], 但应用实例已经证明了移动代理的优点。例如移动代理应用于网络电子贸易^[26], 由顾客传送给销售商以确定订单和送货方式, 再将合约传返回顾客, 顾客不需要直接和销售商接触。移动代理以代理人的身份为了顾客的利益和其他代理人协作, 同时在网络出故障时警告顾客。军方对强鲁棒性的网络应

用更加感兴趣, 而移动代理可以反映不断连续变化的网络状况, 保证应用任务成功完成。

四、传感器配置

直至目前, 分布式传感器网络的大部分研究工作主要集中在给定的传感器网络结构中有效的传感器通讯^[16, 38]和传感器融合^[39, 40]。然而, 由于大量的传感器用于现场操作, 有效的配置策略显得越来越重要。

典型的情况下, 通常多种传感器需要同时使用。这些传感器监测范围、检测能力、价格等都不同。而监测范围大的传感器价格较高, 受成本限制, 有时这些传感器的使用会受到限制。另一方面, 如果只采用短程的传感器, 传感器的数量就会大大增加。因此, 需要有最优的传感器配置策略以降低成本, 同时保证检测结果的准确性。图 6 是在一个栅格间距 100m 的场地上布置不同性能和价格的传感器的不同方案。

传感器在指定场所的配置问题与文献^[41]中的警报设置问题相似。警报器相当于传感器, 在节点中配置警报器的方案应该保证系统中的单个错误(某一节点失效)能够被诊断出来。K.Chakrabarty 等发现在有限拓扑, 例如一系列网格点中, 这一问题可以通过代码理论有效解决^[42]。

传感器被看作二维或三维网格中的交叉点, 传感器被配置于交叉点, 整数线性编程模型(ILP)即可被用来在保证覆盖面积的前提下确定最小成本。图 7 是在二维场地, 给定网格点($p=8$)情况下的网络模型。该模型使用了两种传感

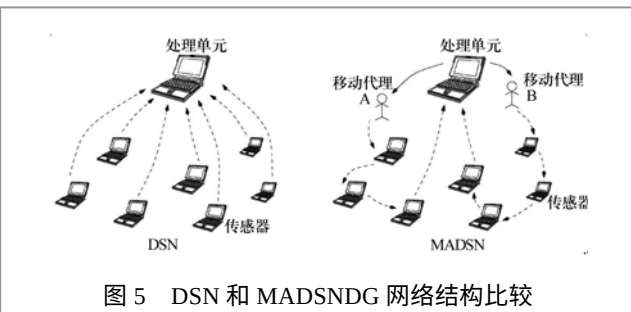


图 5 DSN 和 MADSN 网络结构比较

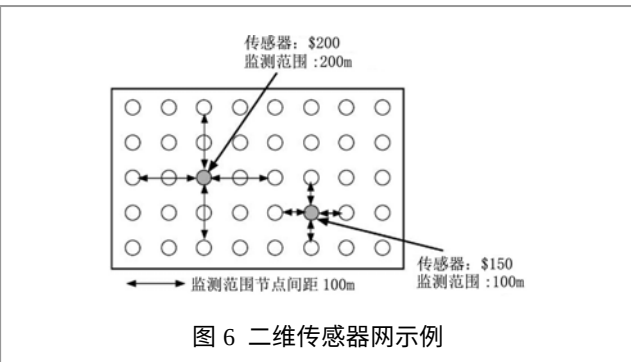


图 6 二维传感器网示例

器, 传感器 A 价格\$150, 监测范围 150m, 传感器 B 价格\$200, 监测范围 200m, 总共使用了 20 个传感器, 传感器密度等于 0.31。

对于 $p=13$ 的二维场地, 需要 65 个传感器监测 169 个网格点, 传感器密度等于 0.38。比理论值 57 略高, 见图 8。

K.Chakrabarty 等假设所有的传感器都是固定的^[42], 因此该模型可以很容易地扩展到移动传感器。移动传感器的监测范围虽然很大, 但同样可以采用 ILP 模型来处理。很多情况下移动传感器跟受欢迎, 因为移动传感器可以在较大的范围内巡视, 也便于重新安排监测位置, 达到更好的监测效果。所以移动传感器增强了传感器性能和生存能力。

五、结论

传感器技术和无线通讯技术的发展给分布式传感器网络的研究带来了光明的前景, 但同时也带来了巨大的挑战。面对海量的数据和能耗的限制, 如何高效、及时的传输和处理数据, 将成为分布式传感器网络研究的重要方向。

参考文献：

- [1]S.S. Iyengar, D.N. Jayasimha, D. Nadig. A versatile architecture for the distributed sensor integration problem[C]. IEEE Trans. Comput. 43 (2) (1994) 175 – 185.
- [2]D.N. Jayasimha, S.S. Iyengar, R.L. Kashyap. Information integration and synchronization in distributed sensor networks[C]. IEEE Trans. Systems, Man, Cybernet. SMC-21(21) (1991) 1032 – 1043.
- [3]A. Knoll, J. Meinkoehn. Data fusion using large multi-agent networks: an analysis of network structure and performance, In: Proceedings of the International Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems (MFI) [C]. Las Vegas, NV, October 2 – 5 1994, IEEE, pp. 113 – 120.
- [4]L. Prasad, S.S. Iyengar, R.L. Kashyap, R.N. Madan. Functional characterization of sensor integration in distributed sensor networks[C]. IEEE Trans. Systems, Man, Cybernet. SMC-21 (5) (1991) 1082 – 1087.
- [5]R. Wesson, F. Hayes-Roth, J.W. Burge, C. Stasz, C.A. Sunshine. Network structures for distributed situation assessment[C]. IEEE Trans. Systems, Man, Cybernet. SMC-11(1) (1981) 5 – 23.

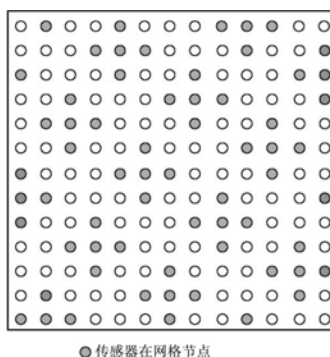
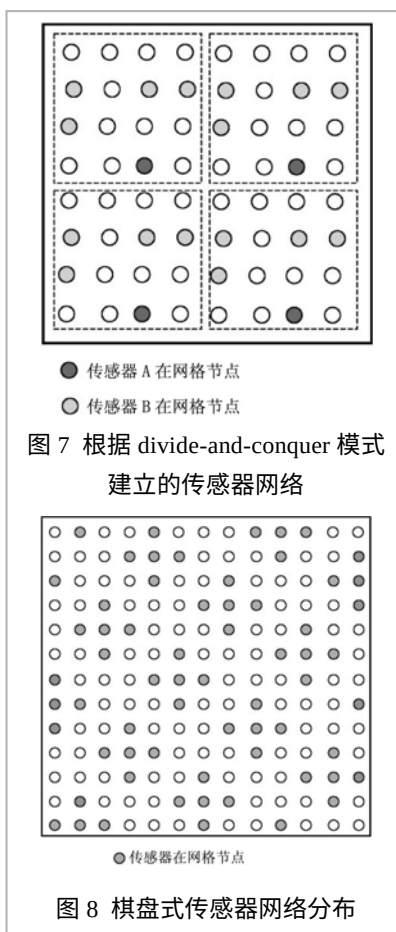
IF. International society of information fusion--publication list[EB/OL].

<http://www.infofusion.org/isif/publications.html>.

- [7]I. Bloch. Information combination operators for data fusion: a comparative review with classification[C]. IEEE Trans. SMC-Part A: Systems and Humans, 26 (1) (1996) 52 – 67.
- [8]R.S. Blum, S.A. Kassam. H.V. Poor, Distributed detection with multiple sensors: Part II-advanced topics, Proc[C]. IEEE, 85 (1) (1997) 64 – 79.
- [9]M. Kokar, K. Kim. Review of multisensor data fusion architectures and techniques, Proceedings of the International Symposium on Intelligent Control[C]. Chicago, IL, August 1993. IEEE, pp. 261 – 266.
- [10]R.C. Luo, M.G. Kay. Multisensor integration and fusion in intelligent systems[C]. IEEE Trans. Systems, Man, Cybernet. 19 (5) (1989) 901 – 931.
- [11]R. Viswanathan, P.K. Varshney. Distributed detection with multiple sensors: Part I-fundamentals[C]. Proc. IEEE 85 (1) (1997) 54 – 63.
- [12]M.R. Samantham, D.K. Pradhan. The debruijn multiprocessor network: a versatile parallel processing and sorting network for VLSI[C]. IEEE Trans. Comput. 38 (4) (1989)

576 – 581.

- [13]C.E. Perkins. Ad Hoc Networking, Addison-Wesley, Reading MA[Z], December 2000.
- [14]A. Lim. Distributed services for information dissemination in self-organizing sensor networks[J]. J. Franklin Institute 338 (6) (2001) 707 – 727.
- [15]F. Wang. Smart management of resource objects in distributed sensor networks[Z]. 2001.
- [16]D. Estrin, R. Govindan, J. Heidemann, S. Kumar. Next century challenges: scalable coordination in sensor networks[C]. ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networks, 1999, pp. 263 – 270.
- [17]A.D. Birrell, B.J. Nelson. Implementing remote procedure calls[J]. ACM Trans. Comput. Systems 2 (1) (1984) 39 – 59.
- [18]S. Baker. Corba implementation issues[C]. IEE Colloq. (Digest) (007) (1994) 5/1 – 5/3.
- [19]A. Watson. Omg (object management group) architecture and corba (common object request broker architecture) specification[C]. IEE Colloq.-Digest, (007) (1994) 4/1.
- [20]Todd Sundsted. An introduction to agents[J]. Java World, June 1998.
- [21]H. Qi, S.S. Iyengar, K. Chakrabarty. Multi-resolution data





integration using mobile agents in distributed sensor networks[C]. IEEE Transactions on SMC: C (2000).

[22]S. Franklin, A. Graesser. Is it an agent, or just a program?: a taxonomy for autonomous agents, In: J.G. Carbonell, J. Siekmann[EB/OL]. Third International Workshop on Agent Theories, Architectures, and Languages. Springer, Berlin, 1996, <http://www.msci.memphis.edu/franklin/AgentProg.html>.

[23]D.B. Lange, M. Oshima. Seven good reasons for mobile agents[J]. Commun. ACM, 42 (3) (1999) 88 – 89.

[24]C.G. Harrison, D.M. Chess, A. Kershenbaum. Mobile agents: are they a good idea? Technical Report RC 19887[EB/OL]. IBM Thomas J. Watson Research Center, March 1995, <http://www.research.ibm.com/massive/mobag.ps>.

[25]D. Milojicic. Mobile agent applications[C]. IEEE Concurrency 7 (3) (1999) 80 – 90.

[26]P. Dasgupta, N. Narasimhan, L.E. Moser, P.M. Melliar-Smith. Magnet: mobile agents for networked electronic trading[C]. IEEE Trans. Knowledge Data Eng. 11 (4) (1999) 509 – 525.

[27]M. Hattori, N. Kase, A. Ohsuga, S. Honiden. Agent-based driver's information assistance system[J]. New Generation Comput. 17 (4) (1999) 359 – 367.

[28]J. Kay, J. Etzl, G. Rao, J. Thies. Atl postmaster: a system for agent collaboration and information dissemination[C]. Proceedings of the Second International Conference on Autonomous Agents, Minneapolis, MN, 1998, ACM, pp. 338 – 342.

[29]T. Oates, M.V.N. Prasad, V.R. Lesser. Cooperative information-gathering: a distributed problem solving approach[C]. IEE Proc.-Software Eng. 144 (1) (1997) 72 – 88.

[30]J.S. Wong, A.R. Mikler. Intelligent mobile agents in large distributed autonomous cooperative systems[J]. J. Systems Software 47 (2) (1999) 75 – 87.

[31]W. Caripe, G. Cybenko, K. Moizumi, R. Gray. Network awareness and mobile agent systems[C]. IEEE Commun. Mag. July 36 (7) (1998) 44 – 49.

[32]K.N. Ross, R.D. Chaney, G.V. Cybenko, D.J. Burroughs, A.S. Willsky. Mobile agents in adaptive hierarchical bayesian networks for global awareness[C]. Proceedings of the IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernet, IEEE, 1998, pp. 2207 – 2212.

[33]K. Marzullo. Tolerating failures of continuous-valued sensors[J]. ACM Trans. Comput. Systems 8 (4) (1990) 284 – 304.

[34]U. Schmid, K. Schossmaier. How to reconcile fault-tolerant interval intersection with the lipschitz condition? Technische Universität Wien[J]. Department of Automation, Vienna, 1999, submitted for publication.

[35]L. Prasad, S.S. Iyengar, R.L. Rao. Fault-tolerant sensor integration using multiresolution decomposition[J]. Phys. Rev. E 49 (4) (1994) 3452 – 3461.

[36]E. Cho, S.S. Iyengar, K. Chakrabarty, H. Qi. A new fault tolerant sensor integration functionsatisfying local lipschitz condition[Z].

2000.

[37]L. Lamport. Synchronizing time servers, Technical Report 18[J]. Digital System Research Center, 1987.

[38]J.M. Kahn, R.H. Katz, K.S.J. Pister. Mobile networking for smart dust[C]. ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networks, 1999.

[39]R.R. Brooks, S.S. Iyengar. Multi-Sensor Fusion: Fundamentals and Applications with Software[C]. Prentice-Hall PTR, Upper Saddle River, NJ, 1998.

[40]S.S. Iyengar, L. Prasad, H. Min. Advances in Distributed Sensor Technology, Prentice-Hall[C]. Englewood Cliffs, NJ, 1995.

[41]N.S.V. Rao. Computational complexity issues in operative diagnosis of graph-based systems[C]. IEEE Trans. Comput. 42 (1993) 447 – 457.

[42]K. Chakrabarty, S.S. Iyengar, H. Qi, E. Cho. Coding theory framework for target location in distributed sensor networks[C]. IEEE International Conference on Information Technology: Coding and Computing, June 2001.

The Research Developing Of Distributed Sensors Network

Abstract: The development of sensor technology and Internet make DSN improving quickly. However, the technology developing also bring so many challenges as limited bandwidth, limited power and processing data in dynamic environment. In this paper, the developing of DSN are overviewed through respects of network structure, data processing and optimum strategy of sensor configuration.

Keywords: distributed sensor network, data process, sensor configuration

作者简介：

焦正，日本大阪大学产业科学研究所博士后、副教授、上海大学射线应用研究所副所长，研究方向为纳米材料和纳米器件。

通讯地址：上海市嘉定区城中路 20 号 邮编：201800

电话：021-69982487

传真：021-69982749

Email:zjiao@mail.shu.edu.cn

吴明红，中国科学院原子核研究所博士、教授、博导，上海大学射线应用研究所所长，研究方向为辐射化学智能凝胶。

王德庆，上海大学射线应用研究所，硕士。研究方向为纳米材料和纳米器件。

本文编辑：朱新宇 读者服务卡编号 001□